

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

城市空间格局与热环境响应关系：以合肥市区为例

陈媛媛¹, 姚侠妹^{1*}, 偶春², 张清怡¹, 姚晓洁¹

(1. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230601; 2. 阜阳师范大学生物与食品工程学院, 阜阳 236037)

摘要: 随着城市不断扩张, 区域的地表覆盖类型发生转变, 大量自然景观被人造景观所替代, 环境温度随之上升。研究城市空间格局与热环境之间的响应关系, 对于改善生态环境、优化城市空间布局有一定的指导意义。基于合肥市区 2020 年的 Landsat 8 系列遥感影像数据及 ENVI 和 ARCGIS 等分析平台, 采用皮尔逊相关性分析与剖面线反映两者之间的关联性, 再选取关联性最大的 3 个空间格局组成要素构建多元回归函数, 以探究城市空间格局对城市热环境的影响及其作用机制。结果表明: ① 2013 ~ 2020 年间, 随着时间推进, 合肥市高温区明显增加。对于不同的季节, 热岛效应呈现出夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。② 中心城区内, 建筑占比、建筑高度、不透水占比和人口密度明显高于郊区, 而植被覆盖度呈现出郊区高于城区, 且在城区主要呈现出点状分布, 水体呈不规则分布。③ 城市高温区主要分布在城区各类开发区内, 而城区内其他地方则以中高温及以上温度分区为主, 郊区以中低温为主。④ 各要素的空间格局与热环境之间的皮尔逊系数为正相关的有建筑占比(0.395)、不透水面占比(0.333)、人口密度(0.481)和建筑高度(0.188), 负相关的为植被覆盖度(-0.577)和水体占比(-0.384)。构建的夏季热环境多元回归函数, 包括建筑占比、人口密度和植被覆盖度的系数分别为 8.372、0.295 和 -5.639, 常数为 38.555。研究结果能够为优化城市空间布局和提高城市居住品质提供参考依据。

关键词: 城市空间格局; 热环境; 相关性分析; 合肥市区; 多元线性回归

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3043-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207042

Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City

CHEN Yuan-yuan¹, YAO Xia-mei^{1*}, OU Chun², ZHANG Qing-yi¹, YAO Xiao-jie¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. School of Biology and Food Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China)

Abstract: With the continuous expansion of cities, the land cover type of the region is transformed, a large number of natural landscapes are replaced by man-made landscapes, and the environmental temperature rises. The study of the response relationship between urban spatial pattern and thermal environment provides some guidance for improving the ecological environment and optimizing the urban spatial layout. Based on the Landsat 8 series remote sensing image data of Hefei City in 2020 and analysis platforms such as ENVI and ARCGIS, Pearson correlation and profile lines were used to reflect the correlation between the two. Then, the three spatial pattern components with the greatest correlation were selected to construct multiple regression functions to investigate the influence of urban spatial pattern on urban thermal environment and its mechanism of action. The results showed that: ① the high temperature area of Hefei City increased significantly with the advance of time during 2013-2020. For different seasons, the urban heat island effect showed that summer > autumn > spring > winter. ② In the central urban area, the building occupancy, building height, imperviousness occupancy, and population density were significantly higher than those in the suburbs, whereas fractional vegetation coverage presented a higher suburban than urban area and mainly showed a point distribution in the urban area and an irregular distribution of water bodies. ③ The urban high-temperature zone was mainly distributed in various development zones in urban areas, whereas other places in urban areas were dominated by medium-high temperature and above-temperature zoning, and suburban areas were dominated by medium-low temperature. ④ The Pearson coefficients between the spatial pattern of each element and the thermal environment were positively correlated with the building occupancy (0.395), impervious surface occupancy (0.333), population density (0.481), and building height (0.188) and negatively correlated with fractional vegetation coverage (-0.577) and water occupancy (-0.384). The coefficients of the constructed multiple regression functions, including building occupancy, population density, and fractional vegetation coverage, were 8.372, 0.295, and -5.639 respectively, with a constant of 38.555. The results of this study can provide a reference basis for optimizing urban spatial layouts and improving urban living quality.

Key words: urban spatial pattern; thermal environment; correlation analysis; Hefei City; multiple linear regression

城市化进程的主要特点是非农业人口大量增长、城市空间不断扩张和社会经济持续聚集等^[1], 导致大量的建筑和不透水面覆盖了原用地, 林地和草地等绿色空间面积降低, 同时工业、人口、车辆和污染物排放等热源的激增^[2,3], 导致城市热环境温度不断攀升, 与城市扩展前的热环境温度形成鲜明对比, 影响了生态环境以及人居环境质量^[4]。而城市内的绿色空间已被证明具有降温增湿和气候改良^[5]等功能, 对于缓解城市热岛效应有着积极的作用。研究

城市空间格局与热环境之间的响应关系, 对于构建城市绿地系统和建设宜居城市有一定的借鉴意义。

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJC760117); 安徽省社会科学创新发展研究课题项目(2021CX182); 安徽建筑大学博士科研启动基金项目(2020QDZ15); 安徽省高峰学科培育课题项目(2021-138); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2020A0456); 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2021197)

作者简介: 陈媛媛(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市热环境和景观生态, E-mail: 2965705275@qq.com

* 通信作者, E-mail: yaomiaomei@126.com

目前针对城市空间与热环境的影响研究已经较为多样. 对于城市热环境情况的获取方法包括地表监测^[6]和遥感数据反演^[7]等. 热环境的影响因素研究则包括从绿地的面积和形状等形态特征^[8], 绿地和水体占比和垂直结构等^[9], 水体和绿地等的缓冲区效应及其空间布局^[10]等多方面探讨中微观角度下绿地或水体的空间结构对城市热环境的影响; 而近些年则主要是从整个城市的景观格局^[11]、建筑结构^[12]、不透水面^[13]和城市下垫面参数^[14,15]等城市形态要素作为切入点从宏观角度展开研究; 在研究方法上, 大部分学者会在区域内选择多个随机点或者随机区域, 再取其内的平均温度值以及影响因素值, 通过空间自相关^[16-18]和皮尔逊相关性分析^[19]等研究两者关联程度, 并利用最小二乘法^[20]和空间滞后模型^[21]等回归模型构建函数, 进而探究两者关系. 由此可见, 目前关于热环境的影响研究多样且深刻, 但是缺少多个城市空间格局影响因子对热环境的响应关系研究, 同时目前的研究多针对上海、纽约等较为发达的城市, 对正处于快速扩展中的合肥市区热环境的研究还较少.

综上所述, 研究基于合肥市区的遥感影像数据及 ARCGIS 和 ENVI 等分析平台, 反演出往年地表温度, 观察合肥市历年和不同季节的热环境空间格局, 随后取热岛效应最为严重的季节内多个时间点的地表温度, 并取其平均值, 再对建筑高度、建筑占比、不透水面占比、水体面积占比、植被覆盖度和人口密度的空间格局要素进行定量化处理, 再利用剖面线和皮尔逊相关性分析, 剖析上述空间格局要素分别对城市热环境的影响程度, 最后通过综合考量, 选取影响程度最大的 3 个要素构建多元回归函数, 以探究城市热环境与空间格局之间的关系, 以期为建设生态宜居型城市提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

合肥市位于中国的华东地区、安徽省中部、江淮之间, 市域范围在东经 116°41′~117°58′, 北纬 30°57′~32°32′之间^[22]; 截止到 2020 年, 常住人口 936.99 万, 城镇化率 76.33%, 建成区面积 528.5 km²^[23]; 合肥市交通便捷, 航路、水路和公路等各类道路在空间上形成纵横交错的三维交通网络, 是全国的综合交通枢纽; 境内主要有丘陵岗地、低洼平原和低山残丘这 3 类地貌, 地形起伏不大, 内含巢湖和江淮水系的部分河流, 地表水系发达^[24]; 本文研究区域是合肥市区, 包括蜀山区、包河区、瑶海区和庐阳区这 4 个市辖区, 区域内拥有合肥经开区和蜀山高

新区等多个开发区, 内含产业园和工业用地等; 除了致力于产业、经济发展, 市区内还含有合肥滨湖湿地森林公园和方兴湖公园等多个公园绿地, 立志于将合肥打造成生态宜居城市. 合肥是合肥都市圈的中心城市^[25], 长三角城市群的副中心城市^[26], 其城区内的良好热环境状态能够保证居民的舒适生活环境和整个合肥市乃至长江流域的良性发展.

1.2 数据来源及预处理

基础数据采集于地理空间数据云 (www.gscloud.cn) 的遥感数据, 借助 ENVI 和 ARCGIS 对遥感影像图进行大气校正、裁剪等预处理, 并将其地表土地覆盖类型划分为绿地、水体、不透水面, 经实地抽样调查验证, 数据总体分类精度达到 80%, 符合实验要求. 人口数据来源于 Worldpop 官网 (www.worldpop.org), 建筑高度通过爬取百度地图现有的建筑位置、范围和高度, 并对其进行补充以及异常值剔除.

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度反演

反演采用的是单窗算法^[27-29], 对于采集到的 Landsat 8 OLI 数据, 采用下式计算:

$$TS(OLI) = [a \times (1 - C - D) + [b \times (1 - C - D) + C + D] \times T_0 - D \times T_a] / (C - 273.5) \quad (1)$$

式中, 对于 Landsat 8 OLI 类型的遥感影像, a 和 b 常量根据合肥市区的具体情况和遥感影像图采集时间定为 -67.355 35 和 0.458 60^[30]; T_0 为 TM6 卫星亮度温度; C 和 D 为中间变量; 计算公式分别如下:

$$T_0 = K_2 / \ln(1 + K_1 / L_\gamma) \quad (2)$$

$$C = \tau \times \varepsilon \quad (3)$$

$$D = (1 - \tau) \times [1 + \tau \times (1 - \varepsilon)] \quad (4)$$

式中, K_1 和 K_2 的值分别为 774.89 和 1321.08^[31], L_γ 为辐射定标后的热红外波段; ε 为地表比辐射率^[32]; τ 为大气透射率 (数据来源: 美国国家航空航天局官网).

其中 ε 与归一化植被指数 NDVI 有密切关系^[33]:

自然表面与城镇表面的地表发射率分别为:

$$\varepsilon_{\text{自}} = 0.962 5 + 0.061 4 \times FVC - 0.046 1 \times FVC \times FVC \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{城}} = 0.958 9 + 0.086 \times FVC - 0.067 1 \times FVC \times FVC \quad (6)$$

式中, ε 为地表比辐射率; FVC 为区域的植被覆盖度.

1.3.2 城市空间形态定量化表达

参考其他学者在空间格局对于热环境的影响上

的研究,以及研区域实际情况,将研究尺度确定为 120 m,并将研究区域划分为 120 m × 120 m 的方格,以便对空间形态进行量化.选取表达城市空间格局的要素有:水体面积占比(WP)、不透水面占比(ISP)、建筑高度(BH)、建筑占比(BD)、植被覆盖度(FVC)和人口密度(PD).空间量化公式如下所示.

(1) WP、ISP 和 BD

$$D = S/S_i \quad (7)$$

式中, D 为统计单元的占比(包含:水体面积占比、不透水面占比和建筑占比); S 为统计单元面积; S_i 为第 i 个统计单元内水体(不透水面和建筑)面积.

(2) BH

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (8)$$

式中, H 为统计单元内平均建筑高度; H_i 为第 i 栋建筑的高度; A_i 为第 i 栋建筑的占地面积;

(3) FVC

植被覆盖度(FVC)的计算公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (9)$$

式中, $NDVI$ 为归一化的植被指数; $NDVI_v$ 为区域被植被全部覆盖时的 $NDVI$ 值,而 $NDVI_s$ 为区域未被植被覆盖时的 $NDVI$ 值^[34].

(4) PD

从 Worldpop 官网下载的栅格数据,其内每一个像元的值为像元大小面积内的人口数量,该像元大小为 100 m × 100 m. 为方便研究,将其转化为密度值,再将其转化为 120 m 分辨率.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n} \quad (10)$$

$$G_i = m_i/S \quad (11)$$

式中, P 为统计单元的人口密度; G_i 为第 i 个原像元内的人口密度; n 为统计单元内包含的原像元个数. m_i 为第 i 个原像元内的人口数量; S 为原像元大小.

1.3.3 皮尔逊相关性分析

皮尔逊相关性分析可以较为直观地反映每一对自变量对因变量的影响程度^[35]. 计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

式中, R_{xy} 为两个变量 x 和 y 之间的相关性系数; x_i 为水体面积占比、不透水面占比、建筑高度等空间格局要素; y_i 为温度数值.

2 结果与分析

2.1 地表热环境及城市空间格局要素特征

2.1.1 合肥热环境空间格局演变概况

如图 1 所示,利用单窗算法,借助 ARCGIS 和

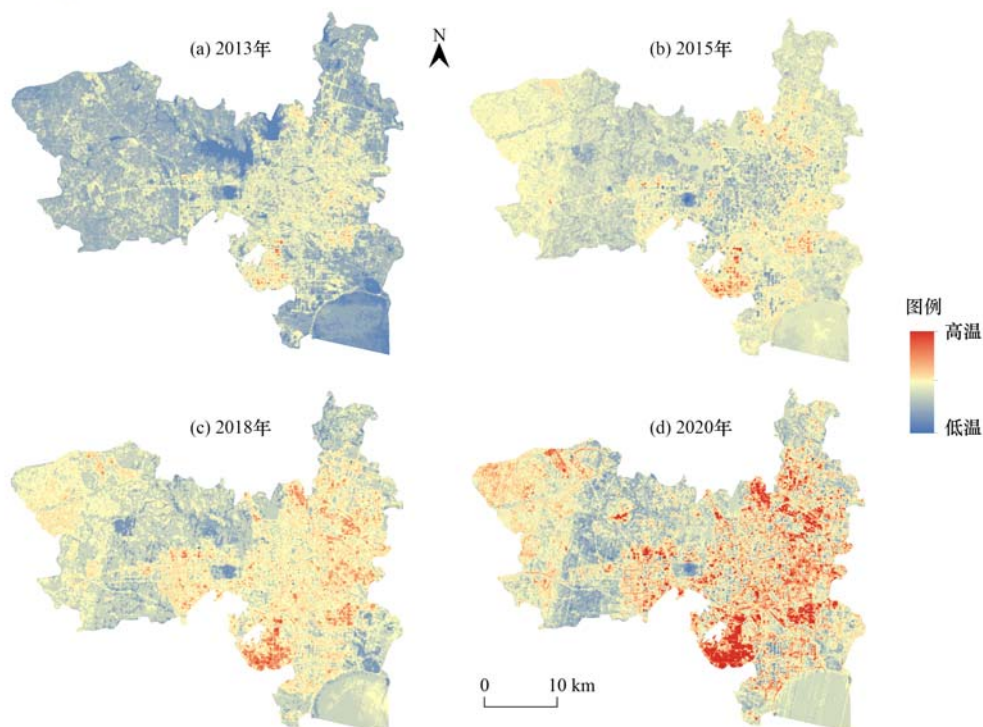


图 1 2013 ~ 2020 年热环境空间格局

Fig. 1 Spatial pattern of thermal environment from 2013 to 2020

ENVI 软件,反演出合肥市区 2013 年、2015 年、2018 年和 2020 年的地表温度,获取到城市热环境空间格局演变概况。

从 2013~2020 年,市区内的中高温区围绕中心城区不断向四周蔓延,侵占了大量的低温区域,主要是往西南与东南方向扩散,热岛重心逐渐向南部转移,表现在蜀山高新区、滨湖新区等区域由低温区转为中高温区,和大量的市区西部地表温度由低温转为中温。同时原本中心城区与周边郊区的温差较

小,但是随着城市空间的扩展,郊区与中心城区的温差越来越大,象征着合肥市区的热岛效应越来越严重,亟待缓解。

2.1.2 合肥市区热环境格局四季演变

根据数据的可获取性、云量、天气和分辨率等原因,反演了 2020 年的 1 月 12 日、4 月 21 日、6 月 5 日和 10 月 27 日这 4 个时间点的地表温度,分别代表合肥市冬季、春季、夏季和秋季的热环境情况,结果如图 2 所示。

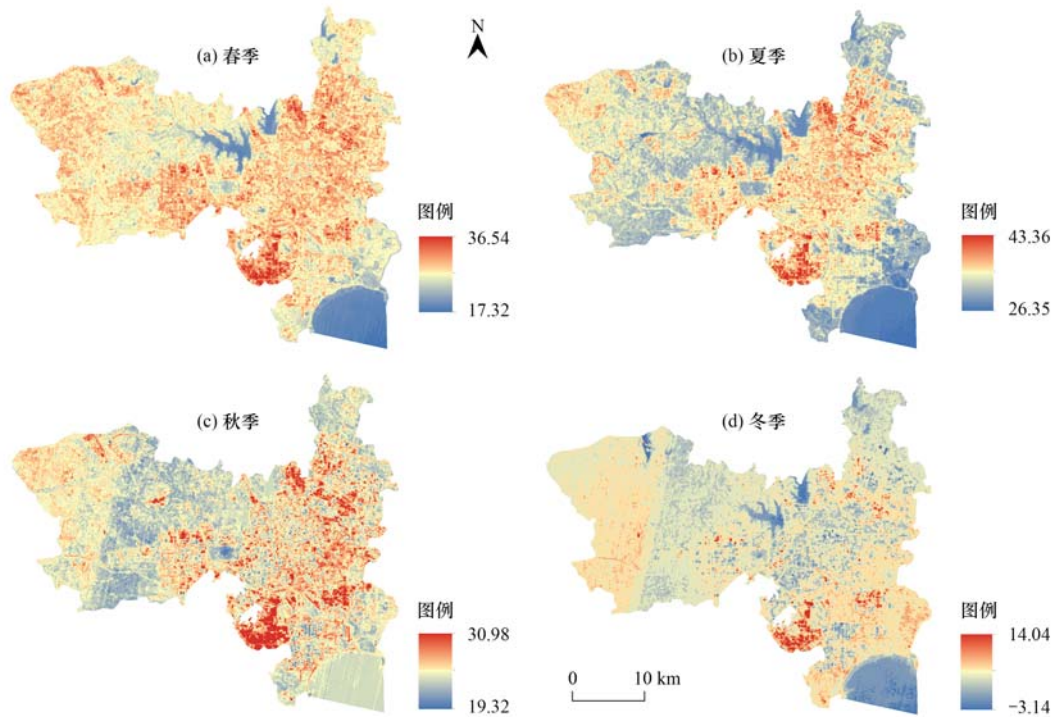


图 2 2020 年四季的热环境空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of the thermal environment for all seasons in 2020

由图 2 可知,4 个季节的高温区和低温区的大小和范围均不一样,其中可发现夏季的城区与郊区的温差最大,中高温区的轮廓最为显著,与城区范围高度重合,其次是秋季和春季,冬天最小,冬季的城区内除经开区、高新区等开发区外,低温区范围甚至多于高温区,与郊区温度相差无几,且没有了清晰轮廓。综上所述,合肥市热岛效应最强的是夏季,其次是秋季、春季以及冬季。

2.1.3 城市空间格局分布特征

利用 ARCGIS 的空间统计分析工具,对合肥市区空间格局要素进行定量化处理,处理结果如图 3 所示。

合肥市区的建筑占比分布与其所在区域有密切关系,城市大部分区域建筑占比在 18% 以下,新建成的住宅区、商业区建筑占比在 18%~23% 之间,而合肥蜀山经开区、包河工业区和经开区等开发区,建筑占比普遍在 23% 以上,占比高于 57% 的区

域面积达到 2.36 km²。从图 3(b)中可以看出,老城区内的建筑高度普遍位于 54 m,围绕老城区、滨湖新区等区域内新建的住宅楼、商业楼等建筑高度较高,而工业厂区等地内的建筑具有占地面积大,高度低的特点,高度在 72 m 以上的建筑占地面积达 12.28 km²。在图 3(c)中,不透水面大致呈现出以围绕中心城区向周围扩展并不断减少,是较为显著的单核扩展模式,高不透水面占比地区主要分布在蜀山经开区、高新区等地,在整体上有 31% 的区域不透水面积占比大于 92%。合肥室内水体主要以巢湖、董铺水库、大房郢水库等大面积水体为主,水体总面积占据了合肥市区的 6.3%。

植被主要覆盖在城市建成区周边,覆盖度在 89% 以上的区域占据了 13.1%,其中包括大蜀山国家森林公园、南艳湖、植物园、滨湖国家森林公园等高植被覆盖区域,而建成区内的植被覆盖度普遍低于 43%。合肥市区人口密度在 11.5 千人·km⁻² 以上的区

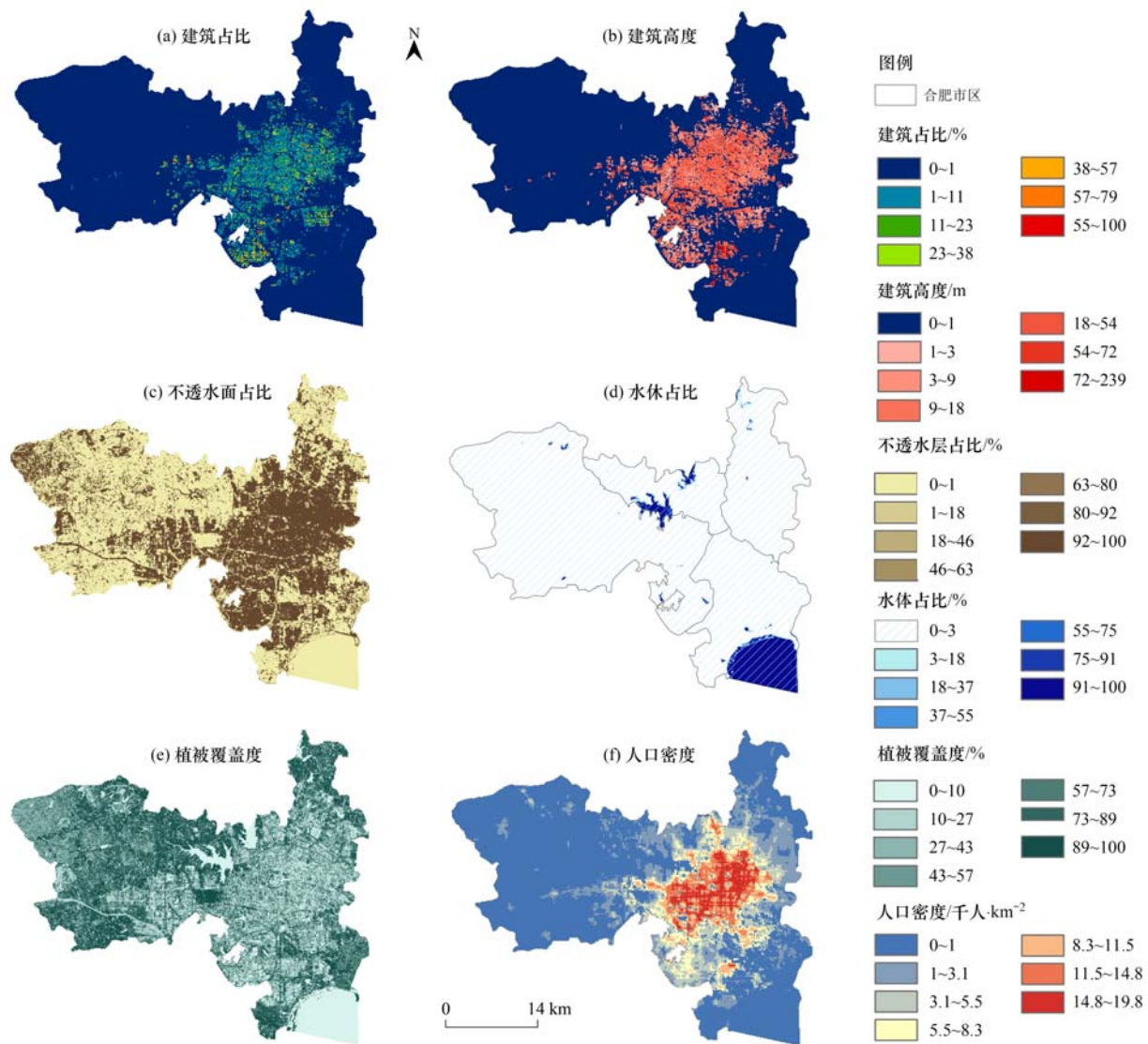


图3 城市空间格局分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of urban spatial pattern

域主要分布在合肥中心城区内,人口分布格局与街道布局有关,主要分布在街道两侧,这些区域主要以多层住宅、高层住宅为主,占据了6.7%的区域,而大部分开发区内虽然建筑占比高,但人口稀疏。

2.2 城市空间格局对城市热环境的影响

2.2.1 夏季平均地表温度

从对合肥市四季的热环境分析来看,其夏季的热岛效应更为严重,城市中心与郊区的温差更大,对人居环境的影响更为强烈,所以选取了合肥市的夏季作为研究时间点,同时为避免单个时间点时出现的由天气原因造成的误差,反演了2020年夏季(5月21日至9月20日)的3个时间点的地表温度,随后利用波段计算,取这3个时间点的地表温度的平均值,结果如图4所示。以下的相关性研究均是基于图4进行。

将地表温度按照自然断点法划分为7个等级,如图4和表1所示。从图4可以看出,从西至东,大

致为中温区-低温区-高温区。西部虽远离主城区,但是由于西部与淮南、六安城市连接,拥有发达的交通线路,且具有机场、各类工业园以及高刘镇等较为发达的小镇,这些区域不透水面和建筑较多,植被少,导致温度升高。结合表1可以得出,中高温区、高温区和极高温区,总面积达到了427.57 km²,在研究区域内占比33.28%,地理位置主要分布在城市建成区内,与郊区温度差距较大,其中高温密集区主要分布在蜀山经开区、包河工业区、庐阳产业园和瑶海产业园等,这些区域位于城市中心周边,温度比城市中心高,而中心城区内部零散分布着一些低温区,这些区域大部分为水体和公园。

2.2.2 空间格局与城市内部温度的相关性

(1)剖面线 在研究区域内划取两条空间格局最为复杂且垂直相交的剖切线(见图4中的line1和line2),同时由于水体分布极其不均匀,所以对水体的研究另外选取了两条垂直相交的剖切线(见图4

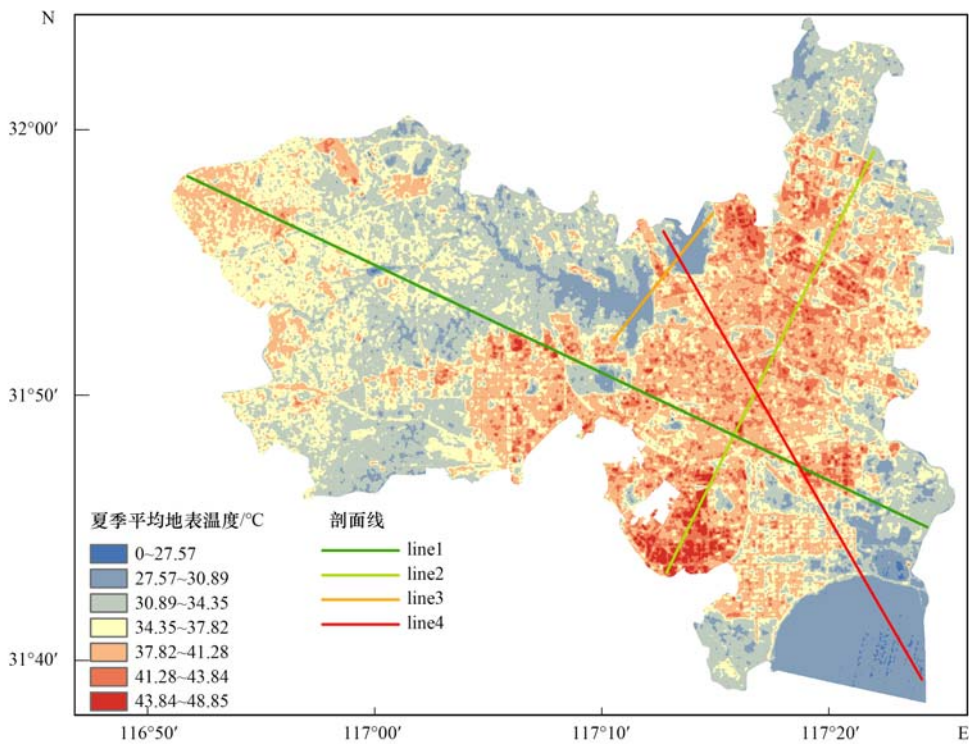


图4 夏季地表平均温度空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of the average surface temperature in summer

表1 地表温度等级

Table 1 Surface temperature level

项目	极低温区	低温区	中低温	中温	中高温	高温区	极高温区
面积/km ²	2.380	142.604	361.432	350.729	322.019	90.136	15.419
占比/%	0.185	11.100	28.133	27.300	25.065	7.016	1.200

中的 line3 和 line4)。line1 起于合肥河东村,止于大圩镇; line2 起于合肥张店村,止于吴郢村; line3 起于大杨镇,止于巢湖内部; line4 起于东大荒,止于高桥村。4 条剖切线均途经中心城区,具体位置见图 4。最后获取到 4 条线上对应的空间格局指数和地表温度值,并将其制作剖面折线图,结果如图 5 和图 6 所示。

从 line1 下的地表温度剖面线先呈现出中温,再降低,最后剧烈升高,分别对应着低密度建设用地区域、耕地及建成区,这与 line1 下的建筑占比、不透水面和人口密度的变化呈现出高度的一致性,与植被覆盖度则相反,如到了高新区,建筑密度与不透水面增高,温度也随之上升,而到了大蜀山、郊区等高植被覆盖度区域则显示出明显的降温趋势; line3 对应的温度为先升温再降温,对应着先经过巢湖、滨湖新区和中心城区再到大杨镇,水体占比先高后低,最后再增高的趋势; line2 为先高温,然后降温,再有所升高,对应着依次途经了蜀山经开区、中心城区和新站工业园,分别对应着建筑占比高、人口密度大但是植被覆

盖度较开发区高以及高建筑占比区域; line4 为低温,增温再降温,对应着依次经过董铺水库、大杨镇和大房郢水库,水体占比先增高,后降低,再增高。

结合 line1 和 line2、line3 和 line4 的剖面线可以得出,建筑占比、建筑高度、不透水面和人口密度这 4 要素的波段曲线与城市地表温度的波段曲线具有相似的走向,当上述 4 要素升高时,地表温度也会升高,反之则降低,表明这 4 个要素与地表温度正相关。而水体和植被覆盖度的剖切线波动与地表温度的剖切线波段走向相反,当这 3 个要素升高时,地表温度降低,反之温度升高,表明该 3 要素与地表温度负相关。

(2)皮尔逊相关性分析 为更加深层次地研究不同空间格局要素对城市地表温度的影响,针对不同的空间格局要素,在区域内生成1 800个随机点,获取到各随机点对应的各空间格局要素的值和地表温度值,并筛选无效值与重复值,形成实验数据组,最终得出各空间格局要素与地表温度之间的皮尔逊相关性系数,如表 2 所示。

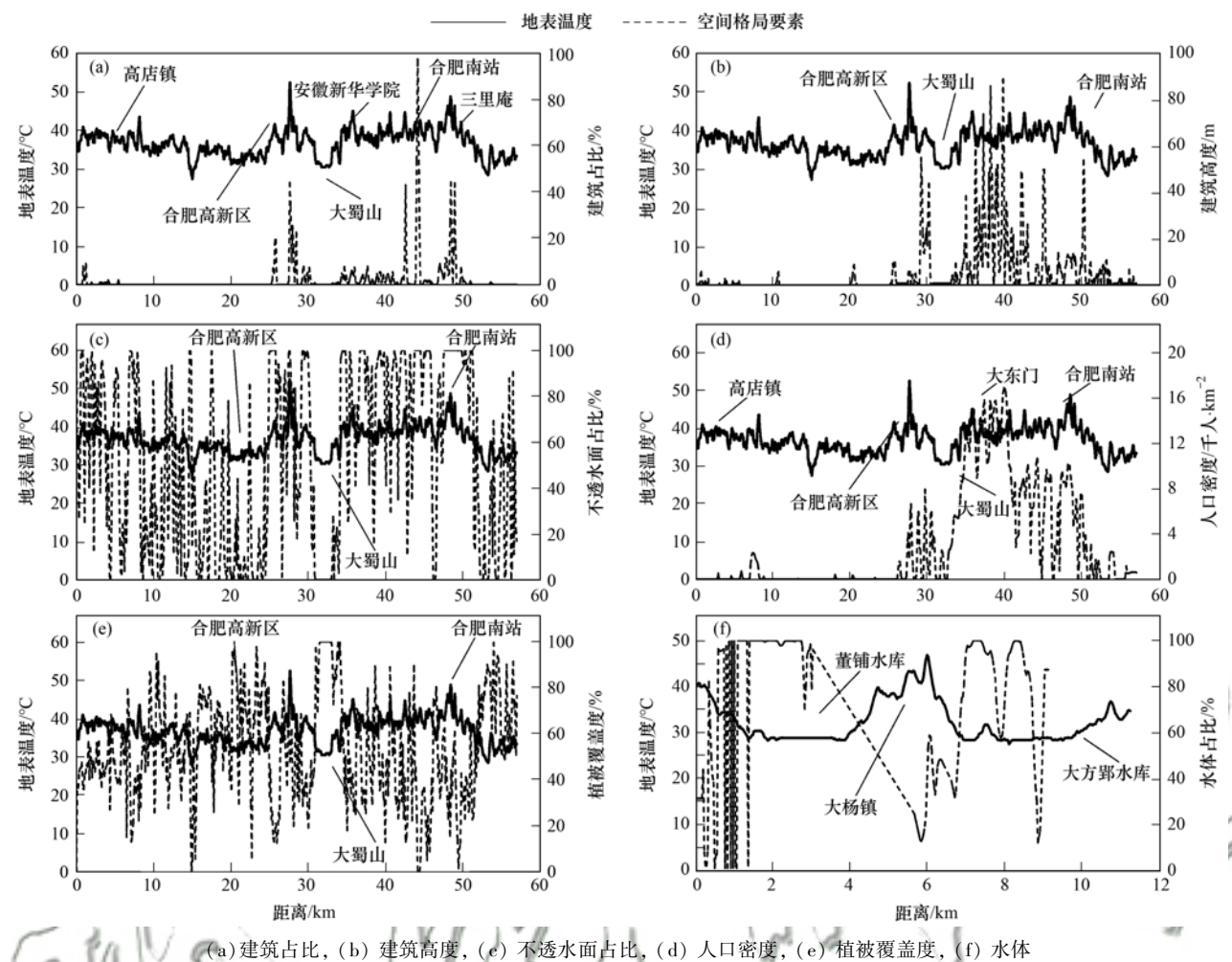


图 5 line1 和 line3 的空间格局与地表温度剖面线

Fig. 5 Spatial pattern of line1 and line3 with the profile line of surface temperature

表 2 空间格局与地表温度的皮尔逊相关性

项目	建筑高度	建筑占比	不透水面占比	水体占比	植被覆盖度	人口密度
Pearson 相关性系数	0.188	0.395	0.333	-0.384	-0.577	0.481
显著性水平(双侧)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
实验数据组数	46	406	430	52	1 498	172

系数的绝对值大小代表了空间格局要素对城市热环境的影响程度. 如表 2 所示,在上述要素中,对地表温度有正面影响的是:人口密度、建筑占比、不透水面和建筑高度,相关性系数值依次降低分别为 0.481、0.395、0.333、0.188,代表了城市内的人口密度和建筑占比是导致城市热环境温度上升,致使城市出现热岛效应的主要因素,当两者在城市中占比越大,城市热源增多,散热能力降低,热环境温度就越高. 而对地表温度呈现出负相关的要素有:植被覆盖度、水体,相关性系数值依次为 -0.577 和 -0.384,均为负数,代表了上述要素能够降低城市地表温度,当其在城市中占比越高时,植物和水体的降温增湿效益越显著,越能够缓解城市热岛效应.

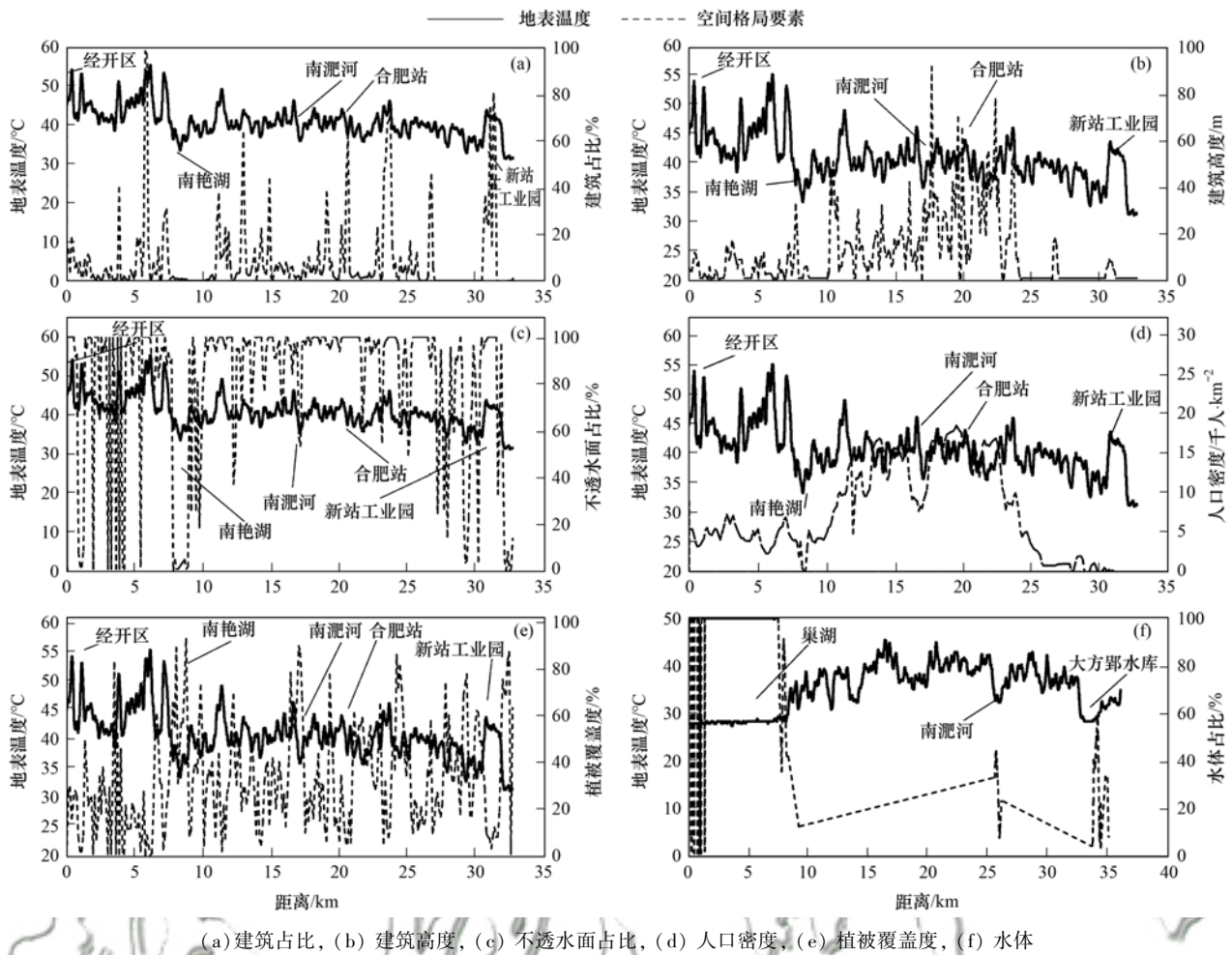
2.2.3 回归分析

综合考虑研究区域实际情况以及剖切线与皮尔逊的相关性分析,从这 7 个要素中选出对地表温度影响程度最大的 3 个要素,即植被覆盖度、人口密度和建筑占比,构建多元线性回归方程,并选取了 1 500 个随机点,获取到该 1 500 个点下的要素值和地表温度值. 同时研究考虑到空间格局要素和地表温度的值属于连续型随机变量,因而采用多元线性回归分析. 最终得到 2020 年合肥市区夏季城市热环境的多元线性函数模型,如公式(13)所示.

$$T = 38.555 + 8.372BD + 0.295PD - 5.639FVC$$

(13)

式中, T 为合肥市夏季地表温度;各要素定义域分别为 $\{BD \mid 0 \leq BD \leq 1\}$, $\{FVC \mid 0 \leq FVC \leq 1\}$ 和 $\{PD$



(a) 建筑占比, (b) 建筑高度, (c) 不透水面占比, (d) 人口密度, (e) 植被覆盖度, (f) 水体

图 6 line2 和 line4 的空间格局与地表温度剖面线

Fig. 6 Spatial pattern of line2 and line4 with the profile line of surface temperature

$|0 \leq PD \leq 19.8|$. 该模型中的 $R^2 = 0.481$, Durbin-Waston = 2.048, 且各个要素的 $VIF \leq 5$, 说明模式回归拟合效果较好, 具有统计学意义, 同时每一组观测值独立, 不存在多重共线性. 同时, 根据变量的累积比例与指定分布的累积比例之间的关系绘制了 P-P 图, 如图 7 所示, 其中的点接近一条直线, 且基本都落在

或者靠近对角线上, 说明数据服从正态分布.

3 讨论

在不同的季节中, 合肥市的热岛效应显现出不同程度, 其中夏季最为明显, 冬季不明显, 这也是本文在相关性研究中选取夏季作为研究时间点的原因. 但是在对于北方的城市的热环境研究里, 还存在冬季热岛效应比夏季明显的情况, 例如刘勇洪等^[36]提到在同样的情况下北京的热岛效应为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 这主要是由于北方城区冬季取暖, 人口密集, 高楼耸立, 导致城区空气不流通, 同时北方郊区冬季植被多数枯萎, 地面裸露, 导致郊区降温比城区多, 进而导致热岛效应明显. 而本文研究的合肥位于北亚热带, 属南方城市, 以亚热带常绿阔叶林为主, 使得冬季城区内也种植有许多的常绿树种, 起到了降温增湿的作用, 与郊区温差小, 而夏季郊区的耕地里面的农作物正处于成长中后期, 植被旺盛, 城区相对于郊区植被面积少很多, 同时城区被大面积的不透水面覆盖, 建筑密集, 从而使得夏季热岛效应严峻, 这与葛静茹等^[37]和李莹莹等^[38]的研究结

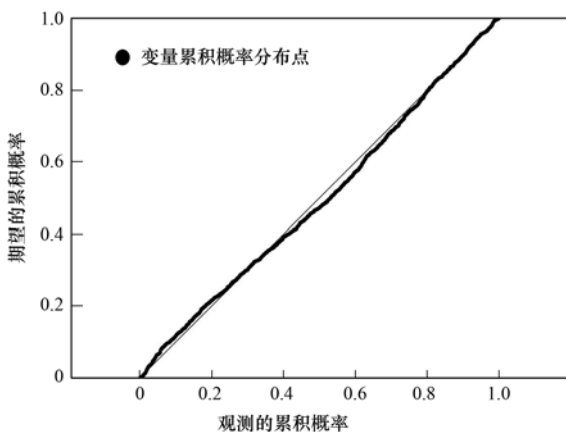


图 7 要素与温度的回归标准化残差 P-P 图

Fig. 7 P-P diagram of the standardized residuals of the regression of the elements on temperature

果相似。

城市中的绿地与水体都具有显著的降温效应,能够改善城市生态环境与局部气候,提供人居环境的舒适性^[39]。有研究发现,城市地表温度的分布与其空间格局有着一定关系,从相关性分析来看,绿地和水面具有较强的降温作用,而以水泥、沥青、砖瓦为主的不透水面、建筑具有升温的作用,而人口作为城市热源,又经常位于多建筑、高不透水面区域,导致人类聚集地温度也较高^[40]。同时距离绿地、

水体的远近也对温度有着一定的影响,采用对大蜀山、巢湖周边具有稳定情况的区域进行剖面,如图8所示,当观测点处于绿地和水体的内部时,温度低且较为稳定,温度变化不大,当观测点位于绿地和水面外时,温度逐渐上升。除此之外绿地与水体的规模、形状等,都对其降温效应有着不同程度的影响,合理的规划建设能够在一定的土地规模内使得两者生态效益最大化,这与陈斌等^[41]和张晓东等^[42]的研究结果基本一致。

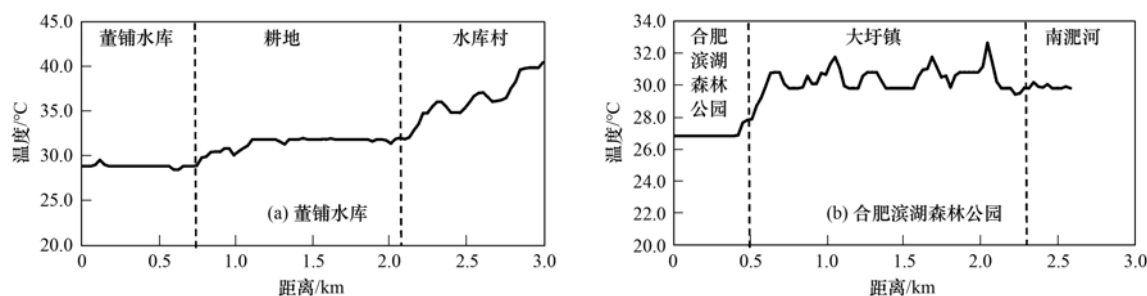


图8 水体、绿地及周边区域的温度剖面线

Fig. 8 Temperature profile of green space, water area, and surrounding area

4 建议

随着城市化进程的推进,建设用地与城市绿地之间的矛盾越发突出^[43,44],城市内部发展在水平面上愈加局促和紧凑,为避免人居环境恶劣,对于合肥这种南方城市,应该增加城区内部的常绿阔叶树种的种植,减少大面积的不透水面区域,减缓夏季的热岛效应,例如可以减少大面积水泥地或瓷砖广场等不必要的不透水面的使用,将类似用地改造成疏林广场;同时进行城市规划时合理分布城市绿地及水体空间,且使其形状复杂化,蔓延至更为宽阔的区域,尽可能发挥出绿地内部的降温效应,影响更多的区域,可以在开发区等建筑占比大的地方通过扩展道路两侧绿化带或定距建立小型公园及湿地等方式,以达到降温的目的;未来的城市绿色空间应当从二维空间上延伸至三维立体空间上,有助于绿色空间从地面延伸到垂直面以及空中^[45,46],这有利于增加城市内的绿色空间,增加绿量,以达到更优化的降温效果,详细措施为:对于建筑高度以及面积要合理控制,增加天空开阔度,降低建筑占比,同时增加垂直绿化以及屋顶绿化,降低热岛效应;对于住宅区,增加区内的平面绿化面积和立体绿化量。

目前对于城市热岛效应的减缓措施研究已经较为多样了,但是很多城市面临着已建成区区域无法拆除,公园和湿地等无法在内部建立,立体绿化对于这种类似的区域是很好的选择,但是国内的立体绿化的景观营造、管理养护等技术还不成熟,无法大

面积投入使用,但是相信随着相关研究的不断深入,这将为未来解决城市严重的热岛效应提供更加完善的解决方案。

5 结论

(1) 2013~2020年间,合肥市区高温范围随着城市扩展而蔓延至滨湖新区、长江西路等区域,城市热环境愈发恶劣。对于2020年的4个季节,研究区域的热岛效应呈现出夏季>秋季>春季>冬季。

(2) 城市空间格局主要与土地利用类型有关,大部分开发区具有建筑占比高(>23%)、不透水面占比高(>92%)、建筑高度普遍偏低(<18 m)、植被覆盖率低(<27%),住宅区和商业区建筑高度较高(>18 m)、建筑占比中等(18%~23%)和人口密度较大(11.5千人·km⁻²)的特点;公园、湿地和郊区等地的植被覆盖度高,分别大于57%,而不透水面少(<18%)。同时城市热环境空间格局显示,高温区主要分布在工业园、产业园等,低温区分布在公园、水体和郊区等。

(3) 在研究时间节点上,研究区域内各空间格局要素与地表温度的剖面线走向有一定的规律,建筑占比、建筑高度、不透水面占比、人口与地表温度为正相关,植被覆盖度和水体为负相关;同时各空间格局要素与地表温度之间的皮尔逊相关性分析的绝对值依次为:植被覆盖度(-0.577)>人口密度(0.481)>建筑占比(0.395)>水体占比(-0.384)>不透水面占比(0.333)>建筑高度

(0.188),由上述两种相关性分析结果可见,建筑占比、人口密度和植被覆盖度与城市热环境的相关性最强.在以上基础上构建了多元回归线性方程,建筑占比、人口密度和植被覆盖度的系数分别为8.372、0.295和-5.639,常数为38.555.

参考文献:

- [1] Zhang S L, Zheng H Q, Zhou H Y, *et al.* Sustainable land urbanization, urban amenities, and population urbanization: evidence from city-level data in China [J]. *Social Science Quarterly*, 2021, **102**(4): 1686-1698.
- [2] 鹿广利,刘传印,孙鑫鑫,等.移动热源对巷道热环境影响的动态模拟研究[J].*煤炭技术*, 2022, **41**(2): 157-161.
Lu G L, Liu C Y, Sun X X, *et al.* Dynamic simulation study on influence of moving heat source on tunnel thermal environment [J]. *Coal Technology*, 2022, **41**(2): 157-161.
- [3] Hoehne C G, Chester M V, Fraser A M, *et al.* Valley of the sun-drenched parking space: the growth, extent, and implications of parking infrastructure in Phoenix [J]. *Cities*, 2019, **89**: 186-198.
- [4] Luo X, Yang J, Sun W, *et al.* Suitability of human settlements in mountainous areas from the perspective of ventilation: a case study of the main urban area of Chongqing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **310**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127467.
- [5] Zhu C Y, Ji P, Li S H. Effects of urban green belts on the air temperature, humidity and air quality [J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2017, **25**(1): 39-55.
- [6] 程志刚,李炬,周明煜,等.北京中央商务区(CBD)城市热岛效应的研究[J].*气候与环境研究*, 2018, **23**(6): 633-644.
Cheng Z G, Li J, Zhou M Y, *et al.* A study on urban heat island effect in Beijing central business district (CBD) [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, **23**(6): 633-644.
- [7] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.1989~2015年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J].*中国环境科学*, 2019, **39**(4): 1734-1743.
Lei J R, Chen Z Z, Wu T T, *et al.* Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989~2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(4): 1734-1743.
- [8] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **80**(4): 386-395.
- [9] Gage E A, Cooper D J. Urban forest structure and land cover composition effects on land surface temperature in a semi-arid suburban area [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, **28**: 28-35.
- [10] 刘艳红,郭晋平,魏清顺.基于CFD的城市绿地空间格局热环境效应分析[J].*生态学报*, 2012, **32**(6): 1951-1959.
Liu Y H, Guo J P, Wei Q S. Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(6): 1951-1959.
- [11] Xiao R, Cao W, Liu Y, *et al.* The impacts of landscape patterns spatio-temporal changes on land surface temperature from a multi-scale perspective: a case study of the Yangtze River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153381.
- [12] Ding L R, Chen C. Thermal environment optimization and energy saving of residential buildings under the demand of low-carbon operation [J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2021, **39**(2): 659-668.
- [13] Xiao R B, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 250-256.
- [14] 姚晓洁,王霞,姚侠妹.基于RS技术的皖北城市阜阳市主城区热环境效应分析[J].*生态学杂志*, 2021, **40**(10): 3290-3303.
Yao X J, Wang X, Yao X M. Thermal environmental effect of the main urban area of Fuyang City in northern Anhui based on RS technology [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(10): 3290-3303.
- [15] Guha S, Govil H, Dey A, *et al.* A case study on the relationship between land surface temperature and land surface indices in Raipur City, India [J]. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 2020, **120**(1): 35-50.
- [16] 王鹏龙,张建明,吕荣芳.基于空间自相关的兰州市热环境[J].*生态学杂志*, 2014, **33**(4): 1089-1095.
Wang P L, Zhang J M, Lv R F. Urban thermal environment pattern with spatial autocorrelation in Lanzhou [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 1089-1095.
- [17] 林晋大,多玲花,邹自力.城市扩张背景下景观破碎化动态演变及空间自相关分析——以南昌市为例[J].*水土保持研究*, 2022, **29**(4): 362-369.
Lin J D, Duo L H, Zou Z L. Dynamic evolution and spatial autocorrelation analysis of landscape fragmentation under the background of urban expansion—A case study of Nanchang City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 362-369.
- [18] 沈中健,曾坚.闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J].*地理学报*, 2021, **76**(3): 566-583.
Shen Z J, Zeng J. Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 566-583.
- [19] 冯悦怡,胡潭高,张力小.城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响[J].*生态学报*, 2014, **34**(12): 3179-3187.
Feng Y Y, Hu T G, Zhang L X. Impacts of structure characteristics on the thermal environment effect of city parks [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(12): 3179-3187.
- [20] Zheng Z, Zhou W Q, Yan J L, *et al.* The higher, the cooler? Effects of building height on land surface temperatures in residential areas of Beijing [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, **110**: 149-156.
- [21] 宋鑫博,黄鹤,郭军,等.城市形态对夏季热环境影响研究——以天津中心城区为例[J].*生态环境学报*, 2021, **30**(11): 2165-2174.
Song X B, Huang H, Guo J, *et al.* Research on the impact of urban morphology on thermal environment in summer: a case of Tianjin Central City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(11): 2165-2174.
- [22] 邬晓光.合肥市城市地理空间基础框架的建设与应用[J].*城市勘测*, 2007, (6): 23-25.
Wu X G. The construction and application of Hefei urban fundamental geographic frame [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007, (6): 23-25.
- [23] 合肥市统计局,国家统计局合肥调查队.合肥统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [24] 李莹莹,尤罗利,陈永生,等.环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J].*生态学报*, 2018, **38**(17):

- 6280-6291.
- Li Y Y, You L L, Chen Y S, *et al.* Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu Basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(17): 6280-6291.
- [25] 陈晓华, 吴仕婧. 南京—合肥双都市圈区域空间格局研究——基于城市流的视角[J]. *华东经济管理*, 2021, **35**(11): 35-44.
- Chen X H, Wu S Q. Research on the regional spatial pattern of Nanjing-Hefei double metropolitans: based on the perspective of urban flow[J]. *East China Economic Management*, 2021, **35**(11): 35-44.
- [26] 宋炳林, 陈琳. 长三角五大都市圈中心城市国际化水平比较研究[J]. *浙江社会科学*, 2017, (6): 57-64.
- Song B L, Chen L. A comparative study of the internationalization level of the central cities in the five metropolitan areas of the Yangtze River Delta[J]. *Zhejiang Social Sciences*, 2017, (6): 57-64.
- [27] Jiang Y, Lin W P. A comparative analysis of retrieval algorithms of land surface temperature from Landsat-8 data: a case study of Shanghai, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(11), doi: 10.3390/IJERPH18115659.
- [28] 胡光庭, 王刚, 杨崇俊. 阳江市绿地空间分布及其热环境分析[J]. *遥感信息*, 2017, **32**(2): 156-161.
- Hu G T, Wang G, Yang C J. Analysis of green landscape distribution and thermal environment of Yangjiang City[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, **32**(2): 156-161.
- [29] Shirani-Bidabadi N, Nasrabadi T, Faryadi S, *et al.* Evaluating the spatial distribution and the intensity of urban heat island using remote sensing, case study of Isfahan city in Iran[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **45**: 686-692.
- [30] Wang F, Qin Z H, Song C Y, *et al.* An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data[J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(4): 4268-4289.
- [31] Zheng W W, Zeng Y N. Comparative analysis of two land surface temperature retrieval algorithms based on multi-source remote sensing data[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **130-134**: 4130-4134.
- [32] 孙艳伟, 王润, 郭青海, 等. 基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 501-512.
- Sun Y W, Wang R, Guo Q H, *et al.* Estimation of the urban heat island intensity change and its relationships with driving factors across China based on the human settlement scale[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 501-512.
- [33] Qiao R R, Dong C Y, Ji S X, *et al.* Spatial scale effects of the relationship between fractional vegetation coverage and land surface temperature in Horqin Sandy Land, North China[J]. *Sensors*, 2021, **21**(20), doi: 10.3390/S21206914.
- [34] 王晓蕾, 石守海. 基于 GEE 的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究[J]. *地球信息科学学报*, 2022, **24**(6): 1087-1098.
- Wang X L, Shi S H. Spatio-temporal changes of vegetation in the yellow river basin and related effect of landform based on GEE[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, **24**(6): 1087-1098.
- [35] Zhu B, Yuan J Q. Pressure transfer modeling for an urban water supply system based on Pearson correlation analysis[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2015, **17**(1): 90-98.
- [36] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 北京城市空间形态对热岛分布影响研究[J]. *地理学报*, 2021, **76**(7): 1662-1679.
- Liu Y H, Xu Y M, Zhang F M, *et al.* Influence of Beijing spatial morphology on the distribution of urban heat island[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(7): 1662-1679.
- [37] 葛静茹, 王海军, 贺三维, 等. 武汉市都市发展区地表温度季节性空间分布与驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(2): 351-360.
- Ge J R, Wang H J, He S W, *et al.* Seasonal-spatial distribution and driving forces of land surface temperature in the urban development area of Wuhan[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(2): 351-360.
- [38] 李莹莹, 邓雅云, 陈永生, 等. 基于卫星遥感的合肥城市绿色空间对热环境的影响评估[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(7): 1224-1233.
- Li Y Y, Deng Y Y, Chen Y S, *et al.* Characterization of urban green space thermal environmental effects based on satellite remote sensing: a case study of Hefei, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(7): 1224-1233.
- [39] 孔繁花, 尹海伟, 刘金勇, 等. 城市绿地降温效应研究进展与展望[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(1): 171-181.
- Kong F H, Yin H W, Liu J Y, *et al.* A review of research on the urban green space cooling effect[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(1): 171-181.
- [40] Sresto M A, Morshed M M, Siddika S, *et al.* Impact of COVID-19 lockdown on vegetation indices and heat island effect: a remote sensing study of Dhaka City, Bangladesh[J]. *Sustainability*, 2022, **14**(13), doi: 10.3390/SU14137922.
- [41] 陈斌, 徐尚昭, 杨顶田, 等. 武汉市主城区公园景观的热环境效应[J]. *遥感信息*, 2021, **36**(3): 58-66.
- Chen B, Xu S Z, Yang D T, *et al.* Thermal environmental effects of park landscape of main urban region in Wuhan[J]. *Remote Sensing Information*, 2021, **36**(3): 58-66.
- [42] 张晓东, 赵银鑫, 马风华, 等. 基于遥感数据的银川市城市公园对城市热环境降温效应分析[J]. *水土保持通报*, 2021, **41**(5): 338-347.
- Zhang X D, Zhao Y X, Ma F H, *et al.* Analysis on cooling effect of urban parks on urban thermal environment in Yinchuan City based on remote sensing[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(5): 338-347.
- [43] 王莹书, 石培基, 赵武生, 等. 兰州市热环境时空特征及影响因素研究[J]. *生态科学*, 2022, **41**(2): 59-65.
- Wang Y S, Shi P J, Zhao W S, *et al.* Spatial-temporal characteristics and influencing factors of thermal environment in Lanzhou[J]. *Ecological Science*, 2022, **41**(2): 59-65.
- [44] 梁建设, 白永平, 杨雪荻, 等. 基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3365-3374.
- Liang J S, Bai Y P, Yang X D, *et al.* Thermal environment evolution and response mechanism of urban sprawl based on multi-source data[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3365-3374.
- [45] 史宝刚, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 ENVI-met 模型的南京市新街口地区垂直绿化降温效应评价[J]. *现代城市研究*, 2021, (12): 125-132.
- Shi B G, Yin H W, Kong F H, *et al.* Assessment of the cooling effect for urban façade greening in Xinjiekou District, Nanjing, China[J]. *Modern Urban Research*, 2021, (12): 125-132.
- [46] 丁威, 王鹏, 黄威, 等. 考虑局域气候影响的海绵城市垂直绿化技术应用[J]. *中国给水排水*, 2019, **35**(12): 85-87.
- Ding W, Wang P, Huang W, *et al.* Application of vertical greening technology in sponge city with influence of local climate[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, **35**(12): 85-87.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)